

Выводы

Увеличение предварительных размеров подошвы на 20% позволило уменьшить величину расчетного давления R до 60% и соответственно давления, которое передается на прочный грунт малой толщины под подошвой. Распределить это давление на подстилающие слои из слабых или структурно-неустойчивых грунтов, которые обеспечивают несущую способность, устойчивость и долговечность массива как основания сооружений.

Список использованных источников

1. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. - М.: 1995. – с. 161.
2. Мустафаев А.А. Фундаменты на просадочных и набухающих грунтах. М.: Изд. «Высшая школа», 1989. – с. 590.
3. Малышев М. В. Прочность грунтов и устойчивость оснований сооружений./М. В. Малышев, - М.: Стройиздат, 1980. – с. 137.
4. Мустафаев А. А. Основы механики просадочных грунтов, М.: Стройиздат, 1978. – с. 263.
5. Тсытович Н.А. Основания и фундаменты. М.: «Высшая школа», 1970. – с. 382.
6. Николаевский В. Н. Современные проблемы механики грунтов./В. Н. Николаевский – В Н. Определение законов механики грунтов. – М.: Мир, 1975. – с. 210-229.
7. Самедов А. М. и др. Нарушение оснований подземных сооружений мелкого заложения в структурно-нустойчивых подстилающих грунтах./А. М. Самедов, Мани А. Д., М. Cudik. H.V. Iubil. Mied. Symp. Geotechnika-Geotechnics, 2012. Mat. Nauk. Glisshice-Ustron, 23-26. pazd. 2012. – s. 151-163.

Статья поступила в редакцию 23.03.2015 г.

УДК 622.235: 539.3

В. Ф. Мейш, докт. физ. – мат. наук (Институт механики НАН Украины)

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ ОБОЛОЧКА – ГРУНТОВАЯ СРЕДА ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ НАГРУЗКАХ

V. F. Meish (Institute of Mechanics of NAS of Ukraine)

WAVE PROCESSES IN THE SYSTEM OF CYLINDRICAL SHELL – SOIL MEDIUM WITH PERIODIC STRUCTURES UNDER IMPULSIVE LOADS

Рассмотрена задача распространения волн в системе цилиндрическая оболочка – грунтовая среда периодической структуры. Грунт моделируется уравнениями нелинейной трехкомпонентной среды. Для численного решения связанной задачи оболочка – грунт применяется конечно - разностная схема Мак – Кормака. Полученные численные результаты позволяют анализировать волновые процессы в системе в зависимости от параметров цилиндрической оболочки и параметров грунтовой среды периодической структуры.

Ключевые слова: *трехкомпонентная грунтовая среда, периодическая структура, цилиндрическая оболочка, волновые процессы, численные методы.*

Розглядається задача розповсюдження хвиль в системі циліндрична оболонка – ґрунтова середовище періодичної структури. Грунт моделюється рівняннями нелінійного трикомпонентного середовища. Для чисельного розв'язку зв'язаної задачі оболонка – ґрунт використовується скінченно – різницева схема Мак – Кормака. Отримані чисельні результати дозволяють аналізувати хвильові процеси в системі в залежності від параметрів циліндричної оболонки та параметрів ґрунтового середовища періодичної структури.

Ключові слова: *трикомпонентне ґрунтова середовище, періодична структура, циліндрична оболонка, хвильові процеси, чисельні методи.*

The problem of wave propagation in the system cylindrical shell - soil medium with periodic structures is represented. Soil is simulated by equations of nonlinear three-component medium. For the numerical solution of the connected problem Mac-Cormack finite – difference scheme is used. The obtained numerical results allow to analyze the wave processes in the system, depending on the parameters of a cylindrical shell and the parameters of soil medium with periodic structures.

Keywords: *three-component soil medium, periodic structures, cylindrical shell, wave processes, numerical methods.*

Введение. Решение динамических задач о взаимодействии деформируемых конструкций с окружающей средой имеет как теоретическое, так и практическое значение. Взаимодействие деформируемых оболочек с грунтовыми средами рассмотрено в работах [1-4,6]. В ряде случаев деформируемые конструкции выполняют роль гасителя нестационарных волн и в определенной мере защищают грунтовую среду от повреждений. Использование деформируемых преград позволяет регулировать величину и характер нестационарных воздействий на грунт. В частности, в работе [4] рассмотрено решение связанной задачи цилиндрическая оболочка – двухслойная грунтовая среда при действии внутренней импульсной нагрузки. Полученные результаты дают возможность регулировать параметры входной волны давления в грунт в зависимости от геометрических и физико – механических параметров оболочки и грунтовой среды. Полученные закономерности протекания волновых процессов в указанных структурах позволяют прогнозировать их динамическое поведение и могут применяться при построении более простых математических моделей для исследования объектов типа оболочка – грунт, оболочка на упругом основании и т. д. [6].

В данной работе рассматривается численное решение задач о взаимодействии цилиндрической оболочки с грунтовой средой периодической структуры при импульсных нагрузках. Работа является логическим

продолжением исследований о распространении цилиндрических волн в грунтовой среде периодической структуры (без учета взаимодействия с конструкциями) [5].

Изложение основного материала исследований. Рассматривается бесконечная подкрепленная цилиндрическая полость в грунтовой среде периодической структуры. Предполагается, что к внутренней поверхности подкрепляющей оболочки при $r = r_0$ приложена распределенная импульсная нагрузка $P_0(r_0, t)$ – (рис. 1).

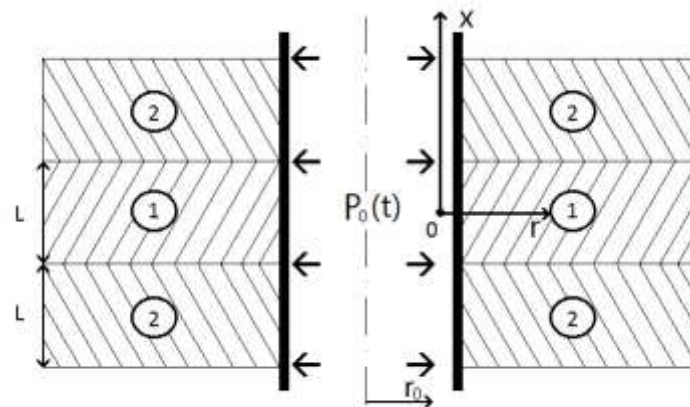


Рис. 1. Схематическая модель расчета

Предполагается, что динамическое поведение подкрепляющей оболочки можно описать в рамках уравнений теории упругих оболочек [6]. Таким образом, рассматривается задача динамического взаимодействия цилиндрической оболочки с грунтовой средой периодической структуры при действии внутренней распределенной нестационарной нагрузки. Уравнения колебаний цилиндрической оболочки с учетом влияния действия на нее грунтовой среды представим согласно модели оболочек типа Тимошенко [6]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{11}}{\partial x} &= \rho h \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}, & \frac{\partial M_{11}}{\partial x} - T_{13} &= \rho \frac{h^3}{12} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial T_{13}}{\partial x} - \frac{T_{22}}{R} + P_3(x, t) - P_r(x, r_0, t) &= \rho h \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

В уравнениях (1) величины u_1, u_3, φ_1 соответствуют компонентам обобщенного вектора перемещений срединной поверхности цилиндрической оболочки; $T_{11}, T_{22}, T_{13}, M_{11}$ – величины интегральных по толщине усилий – моментов цилиндрической оболочки; $P_3(x, t)$ – нагрузка на внутреннюю поверхность цилиндрической оболочки; $P_r(x, r_0, t)$ – давление грунта на оболочку.

Движения среды периодической структуры в случае цилиндрической симметрии описывается системой уравнений в эйлеровых координатах [5,10]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + P) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho uv) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}[r(\rho v^2 + P)] - \frac{P}{r} &= 0, \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

В векторном виде система уравнений (2) имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{F}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{A}}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \bar{B}) + \frac{\bar{C}_0}{r} &= 0, \\ \bar{F} = \begin{pmatrix} \rho u \\ \rho v \\ \rho \end{pmatrix}; \quad \bar{A} = \begin{pmatrix} \rho u^2 + P \\ \rho uv \\ \rho u \end{pmatrix}; \quad \bar{B} = \begin{pmatrix} \rho uv \\ \rho v^2 + P \\ \rho v \end{pmatrix}; \quad \bar{C}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ -P \\ 0 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где u - скорость перемещения частиц вдоль оси x ; v - скорость перемещения частиц вдоль оси r ; ρ - плотность соответствующего слоя грунта; P - давление соответствующей точки грунтовой среды (x, r) .

Уравнения состояния грунтовой среды каждого слоя представляются согласно модели нелинейной многокомпонентной среды В.М. Ляхова [7,8]

$$\frac{\rho_0}{\rho} - \sum_{i=1}^3 \alpha_i \left[\frac{\gamma_i (P - P_0)}{\rho_{i0} c_{i0}^2} + 1 \right] = 0, \text{ или } \Phi(P, \rho) = 0. \quad (4)$$

Связанность задачи взаимодействия оболочка – грунтовая среда обеспечивается заданием условий непротекания на деформированную поверхность оболочки контакта оболочка – грунтовая среда:

$$\dot{u}_1 = u, \quad \dot{u}_3 = v, \quad \text{где:} \quad (5)$$

u, v - скорости границы перемещения грунтовой среды на контакте.

На границе контакта неоднородных грунтовых слоев задаются условия симметрии кинематических и силовых величин. В качестве граничных условий для задачи динамики грунтового слоя принимаются уравнения (1), (5) и условия отсутствия возмущения перемещения на бесконечности.

Численный алгоритм решения задачи. Для решения исходных уравнений теории колебаний оболочек типа Тимошенко (1) используется интегро – интерполяционный метод построения разностных схем для уравнений гиперболического типа [6]. Для численного решения задач динамического поведения грунтовой среды используется двухшаговая схема Мак - Кормака [4 - 6,9,10]:

- на шаге предиктор

$$\tilde{\bar{F}}_1 = \bar{F}_{k,l}^n - \Delta t \left[\frac{\bar{A}_{k,l} - \bar{A}_{k,l-1}}{\Delta x} + \frac{\bar{B}_{k,l} - \bar{B}_{k,l-1}}{\Delta r} + \bar{C}_{k,l} \right]^n, \quad \Phi(\tilde{P}_k, \tilde{\rho}_k) = 0; \quad (6)$$

- на шаге корректор

$$\bar{F}_{k,l}^{n+1} = 0,5 \left\{ \bar{F}_{k,l}^n - \tilde{\bar{F}}_{k,l} - \Delta t \left[\frac{\tilde{A}_{k,l+1} - \tilde{A}_{k,l}}{\Delta x} + \frac{\tilde{B}_{k+1,l} - \tilde{B}_{k,l}}{\Delta r} + \tilde{C}_{k,l} \right] \right\},$$

$$\Phi(P_k^{n+1}, \rho_k^{n+1}) = 0.$$

В скалярном виде уравнения (6) представлены в работе [5].

Для нахождения величины давления P по заданным значениям плотности ρ в уравнении (5) используется итерационная процедура Ньютона – Рафсона. Учитывая, что разностная схема Мак – Кормака (6) является явной, поэтому при расчетах использовалось условие устойчивости: $\max((|u|+c)\tau/\Delta x, (|v|+c)\tau/\Delta r) < 1$, где величина c соответствует локальной скорости распространения звука в грунтовой среде [7, 8].

Численные результаты. Рассматривается задача о распространении цилиндрических волн в грунтовой среде периодической структуры (рис. 1). Предполагается, что к внутренней поверхности подкрепленной цилиндрической полости при $r=r_0$ прикладывается нагрузка $P(r_0, t)$, где

$$P(r_0, t) = A \sin \frac{\pi t}{T} [\eta(t) - \eta(t-T)], \quad A = 10^7 \text{ Па}; \quad T = 50 \cdot 10^{-6} \text{ с}, \quad \eta(t) - \text{функция}$$

Хевисайда. При расчетах полагалось $r_0 = 0,1$ м; $L/r_0 = 4$; $r_0/h = 10$. На рис. 2, 3 приведены результаты численных расчетов – зависимости величин волн давлений P от расстояний r от края подкрепленной цилиндрической полости при $r=r_0$. На рис. 2, 3 представлены три группы зависимостей волн давления для разных времен: $A - 0,75T$; $B - 4T$; $C - 8T$ (для расчетов согласно варианта 1), $C - 7T$ (для расчетов согласно варианта 2).

На рис. 2 приведены зависимости величин давления P от координаты r для расчетов согласно варианта 1. Кривые с индексом 1 соответствуют грунту с параметрами $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,3$; $\alpha_3 = 0,7$ в сечении $x=0$ согласно рис.1. Кривые с индексом 2 соответствуют величинам P в слое грунта с параметрами $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,7$; $\alpha_3 = 0,3$ в сечении $x=L$. Кривые с индексом 3 – величины давления P на границе раздела слоев при $x=L/2$.

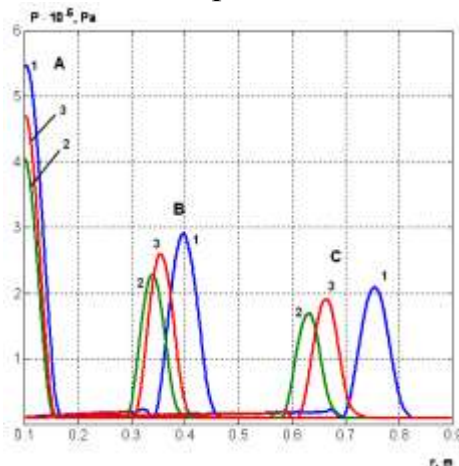


Рис. 2. Зависимость волны давления P от расстояния r для варианта 1

На рис. 3 приведены аналогичные расчеты согласно варианта 2: первый слой грунта со следующими параметрами $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,2$; $\alpha_3 = 0,8$ (кривые 1 – в сечении $x = 0$); второй слой – $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = 0,8$; $\alpha_3 = 0,2$ (кривые 2 – в сечении $x = L$); кривые 3 соответствуют величинам давления P на границе раздела слоев ($x = L/2$). Для обоих случаев в формуле (4) полагалось $\rho_2 = 10^3$ кг/м³, $\rho_3 = 2650$ кг/м³; $\gamma_2 = 7$; $\gamma_3 = 4$.

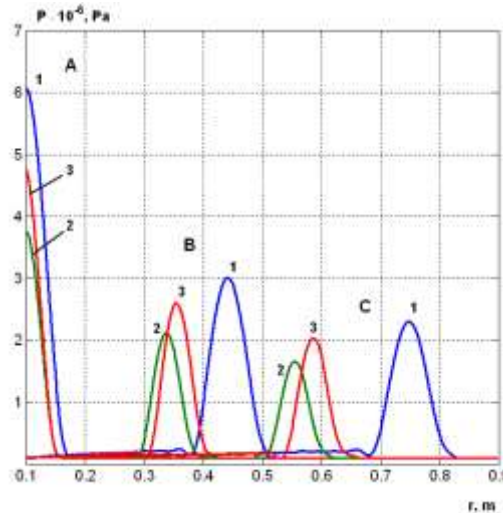


Рис. 3. Зависимость волны давления P от расстояния r для варианта 2

Качественно результаты расчетов по приведенным вариантам данной задачи совпадают с результатами расчетов согласно [5]. Наличие подкрепляющей оболочки в цилиндрической полости вносит свои коррективы – падение амплитуд волн давления в соответствующих сечениях слоев по сравнению с результатами [5]. При этом, значения амплитуд волн давления явно зависят от параметров слоя грунта. Также наблюдается различие результатов по временной координате. Согласно расчетов по варианту 1 амплитуда волны P (кривая 1) в сечении $r/r_0 = 7,5$ достигается при $t = 8T$, а согласно расчетам по варианту 2 достигается при $t = 7T$. Аналогичная картина наблюдается для других вариантов расчетов.

Выводы

Рассмотрено численное решение задач о волновых процессах в системе цилиндрическая оболочка – грунтовая среда периодической структуры при импульсных нагрузках. Полученные результаты позволяют регулировать параметры входной волны давления в грунт и прогнозировать протекание волновых процессов в зависимости от геометрических и физико – механических параметров оболочки и грунтовой среды периодической структуры.

Список использованных источников

1. Баженов В.Г. Численное решение двумерных нестационарных задач взаимодействия тонкостенных конструкций с грунтовыми средами / В.Г. Баженов, А.В. Кочетков, С.В. Крылов, В.Р. Фельдгун // Прикл. проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. Горький: Горьк. ун-т, 1984. – С. 52 – 59.
2. Кочетков А.В. Нестационарное взаимодействие тонкостенных конструкций с ударными волнами в грунтовых средах / А.В. Кочетков, С.В. Крылов, В.Р. Фельдгун // Прикл. проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. Горький: Горьк. ун-т, 1985. – С. 60 – 65.
3. Баженов В.Г. Деформирование цилиндрических оболочек в мягкой грунтовой среде под действием внутреннего импульсного нагружения / В.Г. Баженов, А.В. Кочетков, В.Р. Фельдгун // Прикл. проблемы прочности и пластичности. Методы решения задач упругости и пластичности. Горький: Горьк. ун-т, 1989. – С. 87 – 95.
4. Мейш В.Ф. Математическое моделирование волновых процессов в системе цилиндрическая оболочка – двухслойная грунтовая среда / В.Ф. Мейш, Ю.А. Мейш // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. Наук. праць. – К.: НТУУ „КПІ”. - 2012. – Вип.22. – С. 3 - 8.
5. Мейш В.Ф. Численное решение задач о распространении цилиндрических волн в грунтовых средах периодической структуры / В.Ф. Мейш // Вісник НТУУ „КПІ”. Серія „Гірництво”: Зб. Наук. праць. – К.: НТУУ „КПІ”. - 2014. – Вип. 26. – С. 17 - 23.
6. Головки К.Г. Динамика неоднородных оболочек при нестационарных нагрузках: монография / К.Г. Головки, П.З. Луговой, В.Ф. Мейш; под ред. акад. НАН Украины А.Н. Гузя. – К.: Изд. полигр. центр «Киевский ун-т», 2012. – 541 с.
7. Ляхов В.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. / В.М. Ляхов. – М.: Недра, 1982. – 288 с.
8. Лучко И.А. Механический эффект взрыва в грунтах / И.А. Лучко, В.А. Плаксий, Н.С. Ремез и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с.
9. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2. / К. Флетчер. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
10. Ляхов В.Н. Воздействие ударных волн и струй на элементы конструкций / В.Н. Ляхов, В.В. Подлубный, В.В. Титаренко. – М.: Машиностроение, 1989. – 392 с.

Статья поступила в редакцию 19.03.2015 р.